

## 論 文 要 旨

## Abstract

**Title: Modeling-Based Design of Intelligent Control Paradigms for Modern Wind Generating Systems**

Japanese: 知的制御による風力発電システムのモデルベース設計手法

Against the backdrop of increasing awareness of the effects of global warming due to greenhouse gas emissions and with fossil-fuel prices on the rise and their supply increasingly unstable, the need for more environmentally benign electric power systems is a critical part of the new thrust of engineering for sustainability. To address security of supply and energy diversification, wind energy is regarded the most attractive vanguard of the world's energy challenges as it is clean, fuel-free (produces no CO<sub>2</sub>), and a renewable source of power. Wind plants have benefited from steady advances in technology, and much of the advance has been made in the components dealing with the utility interface, the electrical machine, the power electronic converter, and the control capability.

Wind turbines have become the most cost-effective renewable energy systems available today and are now completely competitive with essentially all conventional generation systems. However, the major problem is the wind's unpredictable nature that forces utility operators to think differently about power generation, with the main challenge being to provide governor functions and controlled ramp-down during high wind speed events. Additionally, wind turbines present nonlinear dynamic behavior and lightly damped resonant modes. This thesis examines design of advanced control paradigms geared toward lessening the negative impact of wind stochasticity on modern MW-class wind energy conversion systems (WECS) during high turbulence. The main control design objectives are to maximize power conversion throughout the operating envelope for steady output power as well as to actively attenuate structural-dynamic load-oscillations of the drive-train.

The proposed paradigms include the linear quadratic Gaussian (LQG), artificial neural networks in form of neurocontrollers, the self-tuning regulator (STR), model-based predictive control (MBPC),  $H_2/H_\infty$  control, and neurofuzzy logic schemes. These yield, singly or in combination, digital systems whereby control is exercised through regulation of generator torque. Their design is enhanced by modeling; the plant and its environment are structured as a system of interacting subsystems that constitute an equivalent model defined in state space. The disturbance (input) signal is the wind that is modelled as a stochastic process constituted by the seasonal mean wind speed and the instantaneous turbulence component, while drive-train components (turbine, gearing and generator subsystems) are represented as a series of inertias linked by 'soft' shafts without friction.

Computer simulations conducted using the MATLAB/Simulink software, with the generator model as an interface between the mechanical and electrical characteristics of the WECS reveal that achieving the objectives of optimal operation for reliability by the proposed multiobjective schemes becomes more attractive *vis-à-vis* the classical proportional-integral-derivative (PID).

Name MUHANDO, Billy Endusa

平成20年1月30日

琉球大学大学院  
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏名 千住 智信



副査 氏名 金城 寛



副査 氏名 倉田 耕治



学位（博士）論文審査及び最終試験の終了報告書

学位（博士）の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

記

申請者	専攻名 総合知能工学専攻 氏名 MUHANDO BILLY ENDUSA 学籍番号 <span style="background-color: black; color: black;">XXXXXXXXXX</span>
指導教員	千住 智信
成績評価	学位論文 <input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格 最終試験 <input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格
論文題目	Modeling-Based Design of Intelligent Control Paradigms for Modern Wind Generating Systems (和文題目: 知的制御による風力発電システムのモデルベース設計手法)
審査要旨 (2000字以内)	地球温暖化対策として自然エネルギーの利用が世界的規模で大きく進展している。特にヨーロッパでは総発電容量の20%以上を風力発電でまかなっている国もあり、今後このような状況が日本を含む諸各国（米国、中国、インド等）で風力発電設備が導入されることになる。日本における風力発電設備の導入目標は300万kWであり、現在のところ150万kW程度の設備容量を有することから今後とも風力発電設備の大幅な増加が見込まれている。

風力エネルギーは希薄で大きく変動するため、化石エネルギーの利用無しで発電可能であるが、エネルギー密度が希薄であるという問題を有している。このため、風エネルギーから得られるエネルギーを最大化するためには風力発電設備を最大電力点で運転する必要がある。このような最適動作点は風速で大きく異なるため最適動作点への追従制御が重要である。しかし、風力発電設備は機械エネルギーを電気エネルギーへ変換することから風速変動時に風車と発電機間に存在する軸系へ軸ねじれを発生する。このような軸ねじれトルクが大きいと、風車軸や風車と発電機間に存在するギアボックスの破断へつながることが大きな問題として知られている。

そこで、本研究では、希薄な風力エネルギーを効率的に電気エネルギーへ変換するための最大電力点追従制御と軸系のストレスを軽減するための制御法を提案している。本研究では、シミュレーションにより提案手法の有効性を示すために、先ず風速モデルについて議論している。次に軸系を含む機械的風車モデルを導出し、軸ねじれがどのように発生するか定式化している。また、風力発電機に採用されている発電機として二次励磁形誘導発電機を採用し、電氣的な制御により軸ねじれ抑制と最大電力点追従が同時に達成できることを示している。本論文で議論された制御法は下記の3種類であり、要約すると以下の内容となる。

1. Linear Quadratic Gaussian (LQG) 制御を風車ピッチ角制御と誘導発電機の二次側有効電力制御へ適用し、最大電力点追従と軸ねじれを低減する制御法を提案している。状態変数情報が必要になることから、カルマンフィルタにより状態を推定している。シミュレーション結果より比例積分 (PI) 制御器よりも提案制御法が制御性能が良好であることが示されている。
2. Self Tuning Regulator (STR) は、オンラインでパラメータ同定を実行する機構が内包されているため、システムのパラメータが不明または変動する場合でも高性能な制御が可能である。風力発電機のパラメータは、風車ピッチ角に応じて風車パラメータが変動するため、制御性能維持に有効であることが示されている。
3. 風車は慣性が大きいため大きな制御入力を印加すると軸系にストレスが発生することになる。モデル予測制御はこのような予測可能なシステムの状態を把握できるため、本研究では良好な制御性能を得るために適用されている。シミュレーション結果より従来制御手法より提案制御手法が軸系ストレスを低減することが示されている。

以上のように、本研究は風力発電機の性能向上に資することから今後の風力発電機導入増加ならびに地球環境保全に有益である。従って、本研究成果は工学的に有用であり、提出された学位論文は博士の学位論文に相当するものとして学位論文の審査を合格とする。また、論文発表会における発表ならびに質疑応答の結果、申請者は専門分野および関連分野の十分な知識ならびに本学大学院博士後期課程修了者として十分な研究能力を有していることが確認できたので最終試験も合格とする。